

Інститут фізичної оптики імені О.Г.Влоха
Міністерство освіти і науки України

Насишин Святослав Юрійович

УДК 535.3+535.5

**МАТРИЧНІ МЕТОДИ ОПИСУ ПОШИРЕННЯ СВІТЛА ЧЕРЕЗ
ДЕФОРМОВАНІ РІДКОКРИСТАЛІЧНІ СЕРЕДОВИЩА**

01.04.05 Оптика, лазерна фізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Львів – 2020

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Львівському національному університеті імені Івана Франка
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор,
Болеста Іван Михайлович,
Львівський національний університет
імені Івана Франка, завідувач кафедри радіофізики
та комп'ютерних технологій

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Крупич Олег Миколайович,
Інститут фізичної оптики імені О. Г. Влоха
МОН України, завідувач сектору поляриметрії

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник,
Дем'янишин Наталія Михайлівна,
Фізико-механічний інститут імені Г. В. Карпенка
НАН України, старший науковий співробітник
відділу № 5 Оптико-цифрових систем діагностики

Захист відбудеться “__” _____ 2020 р. о ___ год. на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д35.071.01 при Інституті фізичної оптики імені О.Г. Влоха
Міністерства освіти і науки України за адресою: 79005, м. Львів, вул.
Драгоманова, 23

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Інституту фізичної оптики
імені О.Г. Влоха МОН України за адресою: 79005, м. Львів, вул. Драгоманова, 23.

Автореферат розіслано “__” _____ 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 35.071.01,
кандидат фізико-математичних наук, ст. наук. сп.

Костирко М. Є.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТКА РОБОТИ

Актуальність теми. Стрімкий розвиток сучасної оптики проявився за останні десятиліття у виникненні ряду нових фундаментальних концепцій таких, як оптика фотонних середовищ (фотонних кристалів зокрема) [1*,2*], оптика метаматеріалів [3*,4*] сингулярна оптика [5*,6*] локалізація світла [7*], випадкова лазерна генерація [8*,9*], бездзеркальна лазерна генерація [10*], зокрема в холестеричних рідких кристалах та супроводжується зростанням ролі оптичних технологій в пристроях побутової електроніки. Рідкокристалічний дисплей є одним із найвагоміших прикладів. Досягнути таких успіхів вдалося в значній мірі завдяки прогресу в комп'ютерному моделюванні оптичних систем.

На сьогоднішній день рідкі кристали мають широке коло застосувань зокрема у рідкокристалічних дисплеях для візуалізації інформації, біомедицині для керування траєкторії руху живих клітин [11*], фізиці полімерів для дослідження властивостей поверхні [12*]. Для розширення та опису вище перелічених застосувань важливе місце посідає аналіз оптичних властивостей деформованих рідких кристалів та рідкокристалічних середовищ із включеннями інших фаз.

Є два підходи для опису поширення світла: геометрична оптика та хвильова оптика. Підхід хвильової оптики застосовують для опису стану поляризації світлової хвилі. У свою чергу у рамках геометричної оптики можна передбачити траєкторію світлового променя.

Підхід хвильової оптики базується на електромагнітній теорії Максвела. Задача про поширення світлової хвилі через холестерик була успішно розв'язана Могеном [13*], а згодом Де Врі [14*]. Однак розв'язувати диференціальні рівняння Максвела не завжди зручно, тому для спрощення розгляду введено матричні методи, серед яких метод матриць Беремана [15*] та метод матриць Джонса [16*-22*] посідають особливі місця. Ці методи значно спростили процедуру опису, але все ж виявились надто громіздкими, а тому непридатними для аналітичних розрахунків при похилому поширенні світла. Під похилим поширенням світла через середовище ми розуміємо поширення світла під кутом до нормалі поверхні середовища. У даній роботі запропоновано компактні аналітичні підходи до опису властивостей деформованих рідкокристалічних середовищ, включаючи холестерик із кроком закрутки співмірним з довжиною світлової хвилі, а також запропоновано підхід для опису просторової дисперсії у рамках методу диференційних та інтегральних матриць Джонса.

Подібно, як у випадку хвильової оптики, для зручності опису напрямку поширення світла у геометричній оптиці введено метод матриці траєкторії (трасування, англ.: tracing) світлового променя (МТПС). У даній роботі цей метод застосований для опису оптичних аберацій у 3D скануючій флуоресцентній конфокальній мікроскопії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі радіофізики та комп'ютерних технологій Львівського національного університету імені Івана Франка в рамках держбюджетних тем:

- Експериментальне дослідження та комп'ютерне моделювання наноструктурованих метал-діелектричних композитів для наноплазмоніки, номер державної реєстрації НДР: 0115U003253 (01.01.2015- 31.12.2016)
- Експериментальне дослідження та комп'ютерне моделювання матеріалів та пристроїв наноелектроніки, номер державної реєстрації НДР: 0116U001681 (01.2016- 31.2018)

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає у розвитку матричних методів Джонса та траєкторії світлового променя для опису поширення світла через деформовані рідкі кристали. Для досягнення поставленої мети розв'язувались наступні задачі:

1. Отримати компактні аналітичні форми узагальнених матриць Джонса для похилого поширення світла через деформовані нематичні рідкі кристали, придатні для формульного аналізу.
2. Отримати диференційні та інтегральні матриці Джонса для загального випадку опису похилого поширення світла через довільно деформований кристал та для часткових випадків альтернативно твістованої та гібридної нематичної комірок.
3. Розширити метод диференційних та інтегральних матриць Джонса для опису оптичної просторової дисперсії світла.
4. Отримати диференційну та інтегральну матриці Джонса для холестерика із довільним кроком закрутки, включаючи режим селективного відбивання.
5. Методом матриці траєкторії світлового променя описати оптичні аберації конфокального мікроскопа у випадку плоского шару неоднорідно орієнтованого рідкого кристалу та сферичної краплі, дотичної до твердої прозорої підкладки.

Об'єкт дослідження: поширення світла в деформованих рідких кристалах

Предмет дослідження. Диференційні та інтегральні матриці Джонса та матриці траєкторії світлового променя для деформованих рідких кристалів.

Методи дослідження. Для виконання поставлених завдань використано матричні методи опису поширення світла в оптично анізотропних середовищах. Зокрема, для опису похилого поширення світла через оптично анізотропне неоднорідне середовище (задачі 1-2) використано метод узагальнених матриць Джонса, відомий в літературі з оптики рідких кристалів як *extended Jones matrix formalism*. Методи диференційних та інтегральних матриць Джонса використано для опису оптичної просторової дисперсії (задачі 3,4) та похилого поширення світла (задачі 1,2) через неоднорідно орієнтований нематичний рідкий кристал. Метод матриці траєкторії світлового променя використано для опису оптичних аберацій в конфокальному мікроскопі, пов'язаних із неоднаковими показниками заломлення середовищ, через які проходить світловий пучок, а також аберацій спричинених орієнтаційними неоднорідностями в деформованому рідкому кристалі (задача 5).

Наукова новизна дисертаційної роботи визначається тим, що у даній роботі **вперше:**

- Отримано компактні аналітичні форми узагальнених матриць Джонса для опису похилого поширення світла через деформовані нематичні рідкі кристали.
- Отримано вирази для диференційної та інтегральної матриць Джонса для опису похилого поширення світла через деформовані нематичні рідкі кристали. Зокрема отримано аналітичні вирази диференційних та інтегральних матриць Джонса для альтернативно-твістованої та гібридної нематичних комірок. Теоретично передбачено, що при похилому поширенні світла через кристалічну пластинку, монотонно деформовану вздовж її нормалі, вона володіє як лінійним, так і циркулярним двозаломлення, навіть без деформації кручення.
- Запропоновано підхід для опису явищ оптичної просторової дисперсії в рамках формалізму диференційних та інтегральних матриць Джонса. Встановлено взаємозв'язок запропонованого підходу із традиційними підходами опису оптичної просторової дисперсії через псевдотензор гірації, а також із підходом Могена для опису поширення світла в холестеріку. Показано, що обидва ці традиційні підходи можна отримати, як часткові випадки із запропонованого підходу диференційних та інтегральних матриць Джонса.
- Отримано диференційну та комплементарну до неї інтегральну матриці Джонса для холестерика із довільним кроком закрутки для всього спектрального діапазону, включаючи режим селективного відбивання.
- Показано, що із врахуванням оптичної просторової дисперсії підхід диференційних матриць Джонса стає придатним для опису розсіювання світла на просторових неоднорідностях показника заломлення.
- Запропоновано підхід 2×2 матриць траєкторії світлового променя для опису оптичних аберацій, спричинених неспівпадінням показників заломлення середовищ, через які проходить світловий пучок у флуоресцентному конфокальному мікроскопі. Теоретично передбачено та експериментально підтверджено, що завдяки просторовій неоднорідності показника заломлення рідкокристалічний шар із просторово неоднорідним розподілом директора та плоскими гладкими поверхнями зображається конфокальним мікроскопом, як шар із шорсткою задньою поверхнею.
- Для опису фокусування зонduючого світлового пучка в краплині, диспергованій у незмішуваній рідині, запропоновано узагальнений підхід, зберігаючи 2×2 розмірність матриць траєкторії світлового променя. Показано, що внаслідок аберацій, спричинених неспівпадінням показників заломлення, сферична крапля дотична до верхньої підкладки комірки, може зображатися конфокальним мікроскопом у формі яйця, сплюсненого вздовж його осі так, що верхня його частина виглядає втиснутою у верхню підкладку.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані результати досліджень можуть бути використані наступним чином:

1. Компактне аналітичне представлення узагальнених матриць Джонса для похилого поширення світла через деформований рідкий кристал може бути використано для моделювання рідкокристалічних дисплеїв та пошуку шляхів

для вирішення проблеми, яка виникає при похилому куті споглядання дисплеїв, відомої в літературі з оптики рідкокристалічних дисплеїв як “viewing angle problem”, а також при вимірюваннях пружної константи кручення K_{22} нематиків в альтернативно твістованій нематичній комірці під дією зовнішнього (електричного чи магнітного) поля, та для опису оптичних сингулярностей в анізотропних середовищах.

2. Запропонований в роботі підхід диференційних і інтегральних матриць Джонса для опису оптичної просторової дисперсії може бути використаний для моделювання оптичних пристроїв (у тому числі модуляторів, бездзеркальних лазерів на рідких кристалах, оптичних томографів та ін.), робота яких ґрунтується на явищах просторової дисперсії світла.
3. Запропонований в роботі підхід диференційних і інтегральних матриць Джонса для опису оптичної просторової дисперсії дозволяє аналітичний опис розсіяння світла в рамках формалізму матриць Джонса.
4. Розвинений в роботі підхід матриці траєкторії світлового променя дозволяє моделювання оптичних аберацій у конфокальній мікроскопії неоднорідних оптично анізотропних середовищ, у тому числі деформованих твердих кристалів, орієнтаційно деформованих рідких кристалів та біологічних об’єктів.

Особистий внесок здобувача. Разом із науковим керівником та здобувачем сформульовано мету роботи і задачі, які необхідно розв’язати для її досягнення.

Основні результати досліджень отримано як самостійно, так і у співпраці із іншими співавторами статей. Особистий вклад автора у публікаціях полягає у наступному:

У статті [1], виходячи із узагальненої матриці Джонса, автором виведено компактне аналітичне представлення узагальненої матриці Джонса в моделі, запропонованій Льеном [23*,24*].

У праці [2] автором отримано вирази для диференційної та інтегральної матриць Джонса для опису похилого поширення світла через деформовані нематичні рідкі кристали, та аналітичні вирази цих матриць для альтернативно-твістованої та гібридної нематичних комірок. Здобувачем показано, що при похилому поширенні світла через монотонно деформовану вздовж нормалі кристалічну пластинку, у ній виникає лінійне та циркулярне двозаломлення.

У статті [3] на основі теоретичного опису експериментальних результатів скануючої 3D конфокальної флуоресцентної мікроскопії здобувач, застосувавши метод матриці траєкторії світлового променя, отримав теоретичні вирази, що пов’язують між собою фактичне та номінальне положення фокуса зондуємого світлового пучка при побудові 3D зображення шару неоднорідно орієнтованого рідкого кристалу та вільно диспергованої краплі. Здобувачем теоретично показано, що рідкокристалічний шар з плоскими гладкими поверхнями та просторово неоднорідними розподілами показника заломлення і директора, зображається конфокальним мікроскопом, як шар із шорсткою задньою поверхнею. Здобувач розробив узагальнений підхід для опису фокусування зондуємого світлового пучка в краплині, диспергованій у незмішуваній рідині, та теоретично

показав, що внаслідок аберацій, спричинених неспівпадінням показників заломлення, сферична крапля дотична до верхньої підкладки комірки, зображується конфокальним мікроскопом у формі еліпсоїда, сплюсненого вздовж його осі так, що верхня частина краплі виглядає втиснутою у верхню підкладку.

У праці [4] здобувач самостійно отримав вирази для диференційної матриці Джонса холестерика для випадків режиму Могена, режиму циркулярно поляризованих хвиль а також для загального випадку, включаючи режим селективного відбивання, і показав, що елементарна матриця Джонса холестерика містить оптичну активність та Джонсове двозаломлення.

У статі [5] здобувач отримав диференційні матриці Джонса холестерика та провів їхній аналіз.

У статті [6] здобувач обґрунтував внесок оптичної просторової дисперсії у диференційну та комплементарну до неї інтегральну матрицю Джонса, та пов'язав диференційну матрицю Джонса із тензором діелектричної проникності. Здобувачем обґрунтовано, що із врахуванням оптичної просторової дисперсії підхід диференційних матриць Джонса стає придатним для опису розсіювання світла на просторових неоднорідностях показника заломлення. Приймав участь у встановленні взаємозв'язку запропонованого підходу матриць Джонса із традиційними підходами опису оптичної просторової дисперсії через псевдотензор гірації, а також із підходом Могена для опису поширення світла в холестерику. Здобувачем особисто показано, що ці традиційні підходи отримуються як часткові випадки із запропонованого підходу диференційних та інтегральних матриць Джонса.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень апробовані на таких міжнародних конференціях: International Conference of Students and Young Scientists on Theoretical and Experimental Physics. EVRIKA-2013, Lviv; International Conference of Students and Young Scientists on Theoretical and Experimental Physics. EVRIKA-2014; Scientific seminar on parametric optics devoted to the 80th anniversary of the birth of Professor O.G.Vloh. 2014; Ukrainian-Polish Scientific and Practical Conference Electronics and Information Technologies (ELIT-2016); IX Ukrainian-Polish Scientific and Practical Conference Electronics and Information Technologies (ELIT-2017); XXII International Seminar on Physics and Chemistry of Solids (eISPCS'20).

Публікації. Результати роботи представлені у імпаکتних журналах, включених до бази SCOPUS, серед яких одна стаття в "Ukrainian Journal of Physical Optics" (IF: 0.8, квартиль Q4 за класифікацією SCImago Journal), три статті у "Physical Review A" (IF: 2.9, квартиль Q1) та одна в журналі "Applied Optics" (IF: 1.4, квартиль Q1). Окрім публікацій в журналах, що включені в базу SCOPUS одна стаття надрукована у фаховому журналі "Електроніка та інформаційні технології".

Структура та обсяг роботи. Дисертація містить вступ, п'ять розділів з викладом оригінальних результатів, висновки та список використаних джерел, який нараховує 111 найменувань на 7 сторінках. Основний зміст роботи викладено на 167 сторінках машинопису.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано її мету та завдання, визначено об'єкт і предмет дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи та публікації автора, а також загальні відомості про структуру і об'єм дисертації.

Перший розділ присвячений літературному огляду методу матриць Джонса та методу матриць траєкторій світлового променя.

Суть матричного методу Джонса полягає в тому, що, знаючи вектор Джонса вхідної хвилі \vec{E}_0 , можна обчислити вектор Джонса вихідної хвилі \vec{E} , використовуючи формулу $\vec{E} = J\vec{E}_0$, у якій J - матриця Джонса, яка описує оптичний елемент [1-6]. У випадку оптичної системи матриця Джонса обчислюється шляхом множення матриць Джонса кожного оптичного елемента системи [16*-22*].

Традиційний підхід матричного формалізму був розроблений спочатку для випадку нормального поширення світла через оптичні системи. Для опису похилого поширення світла у сучасній літературі запропонований так званий підхід узагальнених матриць Джонса. Однак, запропоновані підходи Льєна [23*,24*] та Єха [25*,26*] виявилися надто складними та громіздкими для аналітичних обчислень та аналізу.

Суттєвим недоліком традиційного підходу є те, що матриця J за своєю природою є інтегральною, що обмежує її придатність для неоднорідних середовищ. У випадку неоднорідного середовища його необхідно розглядати, як систему однорідних незалежних безмежно тонких шарів і обчислювати матрицю Джонса шляхом множення матриць кожного шару: $J = \prod_i J_i$ де J_i - матриця Джонса i -го тонкого однорідного шару середовища. За таким алгоритмом неможливо отримати матрицю Джонса деформованого середовища у аналітичному вигляді, придатному для аналізу.

Альтернативний підхід відкриває метод диференційних матриць Джонса. Проведений літературний огляд показав, що у літературі немає побудованої диференційної матриці для опису похилого поширення світлового променя через неоднорідне середовище. Також у літературі немає диференційної матриці Джонса для опису холестерика із довільним кроком закрутки у області режиму селективного відбивання. Апарат матриць Джонса також не використовується для опису розсіяння світла. Опис оптичної просторової дисперсії також не знайшов ще свого вираження на мові формалізму матриць Джонса. На основі приведенного літературного огляду поставлено задачі для дослідження.

У другому розділі розглянуто проблему опису похилого поширення світла через деформовані рідкокристалічні середовища у рамках підходу 2×2 матриць Джонса. В літературі представлено спроби модифікувати метод матриць Джонса шляхом введення так званих узагальнених матриць Джонса (УМД) для похилого поширення світла через рідкі кристали (РК) з просторово неоднорідним розподілом директора. Спочатку Єх [25*,26*], а потім Льєн [23*,24*] отримали УМД для похилого поширення світла. Хоча ці два підходи відрізняються за способом

узгодження граничних умов і тому дають різні форми УМД, вони дають досить непогане співпадіння чисельних результатів при застосуванні для поширення світла через твістовані нематичні рідкокристалічні комірки.

Аналітичні вирази, на яких ґрунтуються методи УМД також виявляються надто громіздкими, щоб їх можна було застосувати для формульного аналізу. В даній роботі ми вирішуємо цю проблему двома підходами, а саме шляхом компактного представлення УМД Льєна [24*] та, застосувавши підхід диференційних матриць Джонса до УМД Єха [1]. Ми проаналізували аналітичні вирази, що задають УМД, запропоновану Льєном та виявили, що шляхом тригонометричних перетворень, без введення будь-яких нових припущень, УМД Льєна можна звести до компактної форми, зручної для формульного аналізу. Завдяки проведеному аналізу отриманого нами компактного представлення УМД Льєна вдалося зрозуміти причини відхилення експериментальних результатів при значних кутах падіння світла від тих, які теоретично отримуються з використанням УМД Льєна. Виявилось, що причина в тому, що модель Льєна використовує неповні граничні умови, зокрема нехтує відбиванням світла на границі елементарних шарів, на які умовно розбивається рідкий кристал [1]. Аналіз отриманого представлення показав, що при кутах падіння значно менших від 45° УМД Льєна все ж придатна для опису похилого поширення світла через деформований рідкий кристал. Відповідний розгляд викладений у першому параграфі другого розділу дисертації.

Інший підхід для отримання компактного представлення УМД полягає у застосуванні диференційних матриць Джонса. У виразі, який пов'язує вектор електричного поля \vec{E} хвилі на виході із зразка із вектором електричного поля \vec{E}^i падаючої хвилі, матриця Джонса J описує оптичну пластинку як цілу, тобто не несе інформації про поширення світлової хвилі всередині пластини і, звичайно, жодним чином не вказує на наявність оптичних неоднорідностей всередині пластини. З цієї причини J називається інтегральною матрицею Джонса (ІМД). Диференційна матриця Джонса (ДМД) N була введена Джонсом для опису оптичних неоднорідностей у зразку. ДМД та ІМД пов'язані через матричну експоненту: $J = \left[\exp\left(\int N(z)dz\right) \right] J_0$, де J_0 - ІМД вхідної поверхні пластинки [2].

Хоча підхід диференційної матриці був спеціально розроблений Джонсом для аналітичних розрахунків, його значення ще не достатньо оцінено, а сам метод насправді фактично є незаслужено забутий. В літературі можна знайти лише кілька прикладів, де використовується ДМД підхід. Швидше за все, це пов'язано з тим, що в більшості випадків, які розглядаються в літературі, формалізм Джонса використовується для технічних цілей оптимізації оптичних систем, таких як рідкокристалічні дисплеї, оптика яких вважається добре зрозумілою і, де перевага віддається результату в числовій формі. Проте, якщо нас цікавить розуміння природи спостережуваних оптичних явищ, можливість передбачення якісно нових властивостей, розробка нових методик вимірювання тощо, аналітичне представлення є більш бажаним. У другому параграфі другого розділу ми демонструємо, що проаналізувавши аналітичне представлення диференційних та інтегральних матриць Джонса для деформованих нематичних комірок можна

передбачати специфічні оптичні властивості, спричинені деформацією. Зокрема, показано, що гібридна нематична комірка (у якій кут нахилу оптичної осі відносно нормалі до комірки плавно змінюється через товщину комірки від 0 до 90°) проявляє оптичне повертання площини поляризації при похилому поширенні світла в певних напрямках. Цей висновок є нетривіальним, оскільки для нехірального нематика, зазвичай, оптичну активність пов'язують із наявністю деформації кручення. Ще один приклад, який демонструє потужність аналітичного підходу ДМД є аналітичний вираз для азимута ефективної оптичної осі для альтернативно-твістованої комірки, що дозволяє безпосереднє вимірювання константи кручення нематика.

У третьому розділі дисертаційної роботи показано, що підхід диференційних та інтегральних матриць Джонса може бути використано для опису явищ оптичної просторової дисперсії (ОПД) в анізотропних середовищах [6]. Традиційно ОПД визначається як залежність $\hat{\epsilon}(\vec{k})$ тензора діелектричної проникності $\hat{\epsilon}$ діелектрика від хвильового вектора \vec{k} світлової хвилі подібно до того, як це є для частотної (ω) дисперсії $\hat{\epsilon}(\omega)$. У матричному формалізмі Джонса диференційна матриця Джонса (ДМД) N є узагальненням для світлового хвильового вектора \vec{k} у тому ж розумінні, як хвильовий вектор \vec{k} є узагальненням для хвильового числа k . Хвильове число, помножене на уявну одиницю $-i$ (взяту з протилежним знаком) є власним значенням диференційної матриці Джонса N через рівняння $N\vec{E} = -ik\vec{E}$ [4-6]. Цей факт наводить на думку, що повинен існувати спосіб опису ОПД на мові формалізму матриць Джонса. У третьому розділі ми показуємо, що такий зв'язок між явищами ОПД і матричним формалізмом матриць Джонса справді існує. Щоб довести це, в роботі теоретично отримано загальне співвідношення між компонентами ДМД та компонентами тензора діелектричної проникності $\hat{\epsilon}$.

Для того, щоб показати місце розвиненого в даній роботі підходу ДМД для опису ОПД серед інших відомих в літературі підходів, ми встановили зв'язок між запропонованим ДМД підходом та традиційним підходом псевдо-тензора гірації, а також із підходом Могена, який був розроблений для опису поширення світла в холестеричних рідких кристалах. В роботі продемонстровано, що класичний підхід псевдо-тензора гірації і підхід Могена можна вивести як часткові випадки запропонованого нами підходу ДМД. У нашому підході інтегральна матриця Джонса (ІМД) $J = e^{Nz}$ для середовища з урахуванням ОПД є добутком ІМД $J^0 = e^{(N^0)z}$ без врахування ОПД та корекційної ІМД $J^D = e^{(N^D)z}$, яка описує внесок ОПД, тобто $J = e^{(N^D)z} e^{(N^0)z}$ [6]. У зв'язку з тим, що в загальному випадку матриці N^D та N^0 не комутують, $e^{(N^D)z} e^{(N^0)z} \neq e^{(N^D+N^0)z}$, а тому матриця N з врахуванням ОПД не є сумою матриці N^0 без врахування ОПД та корекційної матриці N^D .

У загальному випадку, коли всі компоненти корекційної ДМД N^D , що описує ОПД, є ненульовими, секулярне рівняння для показників заломлення власних хвиль є рівнянням четвертого степеня [6]. В роботі показано, що коефіцієнт при кубічному члені показника заломлення є ненульовим лише для ненульових поправок ОПД до

середнього показника заломлення. Для прозорих кристалів при ненульовій поправці ОПД до середнього показника заломлення і нульовими всіма іншими поправками у N^D , секулярне рівняння має два різних дійсних і два комплексно спряжених корені [6]. В залежності від знаку + чи – у виразах перед комплексно спряженими коренями, вони описують розсіяння світла вперед і назад, відповідно. Таким, чином із урахуванням ефекту ОПД до усередненого показника заломлення, формалізм матриць Джонса стає придатними для опису розсіювання світла [6]. В роботі показано, як запропонований підхід диференційних матриць Джонса для опису ОПД може бути використаний для опису поширення світла в холестериках. У другому параграфі третього розділу теоретично отримано диференційну та інтегральну матриці Джонса для холестерика у широкому спектральному діапазоні, включаючи спектральну область селективного відбивання.

У **четвертому розділі** розглянуто поширення світлового променя через холестерик. Найвні у літературі ДМД та ІМД підходи для моделювання поширення світла через холестеричне рідкокристалічне середовище мають обмежене застосування. Вони непридатні для опису режиму селективного відбивання [4,31*]. Ми показали, що ці обмеження є результатом двох основних припущень, які приймаються в цих моделях. По-перше, в попередніх роботах в літературі припускалося, що локальна елементарна ДМД та комплементарна до неї ІМД є матрицями однорідного двозаломлюючого нематика (припущення материнського стану). Згідно з другим припущенням локальна ДМД кожного наступного елементарного шару була отримана шляхом повороту попередньої матриці. Ми показали, що ці два припущення є справедливими лише для холестериків із слабкою закруткою у режимі Могена, а також показали, що припущення материнського стану виключає внесок оптичної просторової дисперсії у показники заломлення [4,27*].

В роботі теоретично виведено ДМД та ІМД для холестерика без цих припущень (згаданих у попередньому абзаці). Отримані у цій роботі ІМД та ДМД для холестерика виведені для будь-яких значень еліптичностей власних хвиль та відповідають елементарній пластинці, що має оптичну активність, двозаломлення та Джонсовий дихроїзм [4]. У граничних наближеннях циркулярно поляризованих хвиль та режиму Могена отримані ІМД та ДМД зводяться до ІМД та ДМД, уже відомих з літератури. В наближеннях режиму Могена, власні хвилі стають лінійно поляризованими; матриця переходу T^{of} зводиться до одиничної матриці; оптична активність та Джонсовий дихроїзм зникають і локальна ДМД стає діагональною. У адиабатичному наближенні ДМД та її матрична експонента стають діагональними, що відповідає однорідному нематіку.

Для того щоб вивести форму елементарної ДМД холестерика, ми встановили зв'язок між розв'язками Могена (показників заломлення n_+ та n_-) рівнянь Максвелла для холестерика та діагональною формою ДМД у локальній системі координат. Ми показали, що власні значення ДМД є хвильовими числами двох еліптично поляризованих хвиль, що поширюються через холестеричне середовище. Далі повна форма ДМД для холестерика будувалася із її діагональної форми. Ми знайшли, що ДМД холестерика у повернутій системі координат не є звичайною матрицею, яка отримана шляхом повороту системи координат [4].

ІМД холестерика ми вивели із комплементарної до неї ДМД для загального випадку та для двох екстремальних наближень циркулярно поляризованих хвиль та режиму Могена. Наші результати показують, що ДМД елементарної пластинки, на які розбивається холестерик у підході ІМД в загальному випадку, є гіротропною пластинкою, яка має лінійне двозаломлення та Джонсовий дихроїзм. Вона зводиться до ДМД недеформованого нематика лише у граничному наближенні режиму Могена, який відповідає слабкій закрутці поля директора. Хоча антисиметричні елементи локальної ДМД у режимі Могена рівні нулю, поворот площини поляризації з'являється за рахунок ІМД, у якій діагональна матрична експонента множить на поворотну матрицю [4,27*].

У протилежному екстремальному наближенні циркулярно поляризованих власних хвиль, що поширюються в холестерик у коротким кроком закрутки та низьким двозаломленням материнського нематика, ІМД холестерика зводиться до поворотної матриці, яка дає поворот площини поляризації, який співпадає з тим, що отримуємо із вигляду ДМД та з тим, який відомий із літератури [4,27*].

Одна із основних знахідок цього розділу полягає в тому, що елементарна ДМД холестерика, на які він розбивається не є матрицею однорідного нематика, як це вважалося в літературі до сьогодні. Цей факт пояснюємо ґрунтуючись на кристалографічних аргументах. А саме, кристалографічна точкова група симетрії холестерика та механічно твістованого нематика ($\infty 2$) відрізняється від кристалографічної точкової групи симетрії однорідного нематика. Відмінність у симетрії передбачає відмінності у фізичних властивостях. У зв'язку з цим ДМД елементарного шару холестерика в загальному випадку відрізняється від ДМД недеформованого нематика, але у граничних випадках слабкої закрутки поля директора, що відповідають режиму Могена та адіабатичного режиму, зводиться до неї.

Ми вважаємо, що ДМД та ІМД, отримані в цьому розділі, які враховують просторову дисперсію, можуть бути використані для моделювання оптичних властивостей деформованих холестериків, у тому числі тих, що піддаються дії зовнішнього поля. Ми передбачаємо, що наші елементарна ІМД та локальна ДМД придатні для моделювання оптичних властивостей рідкокристалічних ТГВ (англ.: twist grain boundary) фаз та нематичної $N_{\text{тб}}$ (англ.: twist-bend) фази, а також для геліконічного стану холестерика з низьким модулем пружності K_{33} під дією зовнішнього поля.

П'ятий розділ дисертації присвячений розвитку методу матриці траєкторії світлового променя (МТПС) для опису оптичних абераций у конфокальній мікроскопії деформованих рідких кристалів. Використовуючи метод МТСП, розглянуто фокусування Гаусового пучка всередині плоского капіляра, заповненого рідиною. Отримано співвідношення між фактичним положенням фокуса (ФПФ) та номінальним положенням фокуса (НПФ) для Гаусового пучка, сфокусованого у заповненому рідиною капілярі. Отриманий вираз описує так зване перемасштабування, викликане неспівпадінням (відмінністю) показників заломлення (НПЗ). Відповідно до цієї властивості шар з товщиною d_0 та показником заломлення n буде зображатися конфокальним мікроскопом із сухим

об'єктивом у вигляді шару, який у n разів тонший, ніж повітряний шар тієї ж товщини [3]. Цю властивість проілюстровано зображенням, отриманим з допомогою флуоресцентного конфокального мікроскопа для плоского скляного капіляра, частково заповненого гліцерином з домішкою барвника, по обидва боки від меніска на межі розділу гліцерин-повітря.

Теоретично передбачено та експериментально підтверджено, що плоский шар РК із просторово неоднорідною орієнтацією директора повинен зображатися конфокальним мікроскопом у вигляді шару із неоднорідною товщиною а саме так, що верхня (тобто задня) його поверхня буде виглядати шорсткою [3].

Наступним кроком було застосування підходу МТСП до фокусування параксіального Гаусового пучка всередині сферичної краплі. Показано, що для осьового випадку ніякого зміщення положення фокуса пучка внаслідок НПЗ не повинно спостерігатися лише для двох його положень, а саме, коли фокус пучка знаходиться у центрі сферичної краплі чи на її південному полюсі; всі інші положення фокуса на зображеннях конфокального мікроскопа виявлятимуться зміщеними у напрямку до центра краплі. Отриманий вираз, що пов'язує ФПФ та НПФ в осьовому випадку еквівалентний інваріанту Аббе для заломлення сферичною поверхнею [3].

Для поза-осьового фокусування всередині краплі розроблено узагальнений метод, що зберігає 2×2 розмірність МТСП. Теоретично передбачено та експериментально підтверджено, що завдяки ефекту НПЗ сферична крапля зображатиметься конфокальним мікроскопом з сухим об'єктивом як фігура, схожа на стиснуте яйце (на відміну від звичайного яйця, яке має видовжену форму) [3]. Спотворення форми за рахунок НПЗ супроводжується ще однією цікавою особливістю. Якщо крапля розмішена впритул під верхньою поверхнею щілини плоского капіляра, то верхня частина зображення краплі виглядатиме вбудованою у скляну стінку капіляра. Ця теоретично передбачена особливість зображення краплі підтверджена експериментально. Теоретичні передбачення, представлені в цьому (п'ятому) розділі, потрібно враховувати при аналізі зображень конфокальної мікроскопії для зразків з неоднорідним показником заломлення, як наприклад для РК з неоднорідним розподілом директора та для зразків з включеннями інших фаз. Розвинутий теоретичний апарат та висновки будуть корисні при аналізі зображень конфокальної мікроскопії біологічних зразків.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У даній роботі розвинуто матричні методи Джонса та траєкторії світлового променя для опису поширення світла через деформовані рідкі кристали, зокрема:

1. Отримано компактні аналітичні форми узагальнених матриць Джонса для опису похилого поширення світла через деформовані нематичні рідкі кристали.
2. Отримано вирази для диференційної та інтегральної матриць Джонса для опису похилого поширення світла через деформовані нематичні рідкі кристали. Зокрема отримано аналітичні вирази диференційних та інтегральних матриць Джонса для альтернативно-твістованої та гібридної нематичних комірок. Теоретично передбачено, що при похилому поширенні світла через

- кристалічну пластинку, монотонно деформовану вздовж її нормалі, вона володіє як лінійним, так і циркулярним двозаломлення, навіть без деформації кручення.
3. Запропоновано підхід для опису явищ оптичної просторової дисперсії в рамках формалізму диференційних та інтегральних матриць Джонса. Встановлено взаємозв'язок запропонованого підходу із традиційними підходами опису оптичної просторової дисперсії через псевдотензор гірації, а також із підходом Могена для опису поширення світла в холестеріку. Показано, що обидва ці традиційні підходи можна отримати, як часткові випадки із запропонованого підходу диференційних та інтегральних матриць Джонса.
 4. Отримано диференційну та комплементарну до неї інтегральну матриці Джонса для холестерика із довільним кроком закрутки, включаючи режим селективного відбивання.
 5. Показано, що із врахуванням оптичної просторової дисперсії підхід диференційних матриць Джонса стає придатним для опису розсіювання світла на просторових неоднорідностях показника заломлення.
 6. Запропоновано підхід 2×2 матриць траєкторії світлового променя для опису оптичних аберацій, спричинених неспівпадінням показників заломлення середовищ, через які проходить світловий пучок у флуоресцентному конфокальному мікроскопі. Теоретично передбачено та експериментально підтверджено, що завдяки просторовій неоднорідності показника заломлення рідкокристалічний шар із просторово неоднорідним розподілом директора та плоскими гладкими поверхнями зображається конфокальним мікроскопом, як шар із шорсткою задньою поверхнею.
 7. Для опису фокусування зондуєчого світлового пучка в краплині, диспергованій у незмішуваній рідині, запропоновано узагальнений підхід, зберігаючи 2×2 розмірність матриць траєкторії світлового променя. Показано, що внаслідок аберацій, спричинених неспівпадінням показників заломлення, сферична крапля дотична до верхньої підкладки комірки, може зображатися конфокальним мікроскопом у формі яйця, сплюсненого вздовж його осі так, що верхня його частина виглядає втиснутою у верхню підкладку.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1*] Yablonovitch, E. Photonic crystals: Semiconductors of light. 2001. 34–41 p.
- [2*] Yablonovitch, E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. *Physical Review Letters*. 1987. Vol. 58, No. 20. С. 2059–2062.
- [3*] Engheta, N. (Nader), Ziolkowski, R. W., Institute of Electrical and Electronics Engineers. *Metamaterials: physics and engineering explorations*: Wiley-Interscience, 2006. 414с.
- [4*] Shelby, R. A., Smith, D. R., Nemat-Nasser, S. C., та ін. Microwave transmission through a two-dimensional, isotropic, left-handed metamaterial. *Applied Physics Letters*. 2001. Vol. 78, No. 4. С. 489–491.

- [5*] Nye, J. F. Berry, M. V. Dislocations in wave trains. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*. 1974. Vol. 336, No. 1605. C. 165–190.
- [6*] Basistiy, I. V., Bazhenov, V. Y., Soskin, M. S., та ін. Optics of light beams with screw dislocations. *Optics Communications*. 1993. Vol. 103, No. 5–6. C. 422–428.
- [7*] John, S. Localization of Light. *Physics Today*. 1991. Vol. 44, No. 5. C. 32–40.
- [8*] Wiersma, D. S., Lagendijk, A. Light diffusion with gain and random lasers. *Physical Review E - Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics*. 1996. Vol. 54, No. 4 SUPPL. B. C. 4256–4265.
- [9*] Wiersma, D. S., Albada, M. P. Van, Lagendijk, A. Random laser? / Nature Publishing Group, 1995. 203–204 p.
- [10*] Dudok, T. Nastishin, Y. Optically pumped mirrorless lasing. A Review. Part II. Lasing in photonic crystals and microcavities. *Ukr. J. Phys.* 2014. Vol. 15, No. 2. C. 55–67.
- [11*] Peng, C., Turiv, T., Guo, Y., та ін. Command of active matter by topological defects and patterns. *Science*. 2016. Vol. 354, No. 6314. C. 882–885.
- [12*] Stetsyshyn, Y., Raczkowska, J., Budkowski, A., та ін. Cholesterol-Based Grafted Polymer Brushes as Alignment Coating with Temperature-Tuned Anchoring for Nematic Liquid Crystals. *Langmuir*. 2016. Vol. 32, No. 42. C. 11029–11038.
- [13*] Mauguin, C. Sur les cristaux liquides de M. Lehmann. *Bulletin de la Société française de Minéralogie*. 1911. Vol. 34, No. 3. C. 71–117.
- [14*] Vries, H. de. Rotatory power and other optical properties of certain liquid crystals. *Acta Crystallographica*. 1951. Vol. 4, No. 3. C. 219–226.
- [15*] Berreman, D. W. Optics in Stratified and Anisotropic Media: 4×4-Matrix Formulation. *Journal of the Optical Society of America*. 1972. Vol. 62, No. 4. C. 502.
- [16*] Jones, R. C. A New Calculus for the Treatment of Optical Systems VII. Properties of the N-Matrices. *Journal of the Optical Society of America*. 1948. Vol. 38, No. 8. C. 671.
- [17*] Jones, R. C. A New Calculus for the Treatment of Optical Systems VI. Experimental Determination of the Matrix. *Journal of the Optical Society of America*. 1947. Vol. 37, No. 2. C. 110.
- [18*] Jones, R. C. A New Calculus for the Treatment of Optical Systems V. A More General Formulation, and Description of Another Calculus. *Journal of the Optical Society of America*. 1947. Vol. 37, No. 2. C. 107.
- [19*] Jones, R. C. A New Calculus for the Treatment of Optical Systems IV. *Journal of the Optical Society of America*. 1942. Vol. 32, No. 8. C. 486.
- [20*] Jones, R. C. A New Calculus for the Treatment of Optical Systems III. The Sohncke Theory of Optical Activity. *Journal of the Optical Society of America*. 1941. Vol. 31, No. 7. C. 500.
- [21*] Hurwitz, H., Jones, R. C. A New Calculus for the Treatment of Optical Systems II. Proof of Three General Equivalence Theorems. *Journal of the Optical Society of America*. 1941. Vol. 31, No. 7. C. 493.

- [22*] Jones, R. C. A New Calculus for the Treatment of Optical Systems I Description and Discussion of the Calculus. *Journal of the Optical Society of America*. 1941. Vol. 31, No. 7. C. 488.
- [23*] Lien, A. A detailed derivation of extended Jones matrix representation for twisted nematic liquid crystal displays. *Liquid Crystals*. 1997. Vol. 22, No. 2. C. 171–175.
- [24*] Lien, A. Extended Jones matrix representation for the twisted nematic liquid-crystal display at oblique incidence. *Applied Physics Letters*. 1990. Vol. 57, No. 26. C. 2767–2769.
- [25*] Gu, C., Yeh, P. Extended Jones matrix method II. *Journal of the Optical Society of America A*. 1993. Vol. 10, No. 5. C. 966.
- [26*] Yeh, P. Extended Jones matrix method. *Journal of the Optical Society of America*. 1982. Vol. 72, No. 4. C. 507–513.
- [27*] Chandrasekhar, S., Ranganath, G. S., Kini, U. D., та ін. Theory of the Optical Properties of Non-absorbing Compensated Cholesteric Liquid Crystals. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 1973. Vol. 24, No. 3–4. C. 201–211.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ВИКЛАДЕНІ У ПРАЦЯХ

Фахові видання

1. Nastishin, Y.A., **Nastyshyn, S.Yu.** Explicit representation of extended Jones matrix for oblique light propagation through a crystalline slab. *Ukrainian Journal of Physical Optics*. 2011. Vol. 12. No. 4. C. 191-201.
2. Nastishin, Yu.A., **Nastyshyn, S.Yu.** Differential and integral extended Jones matrices for oblique light propagation through a deformed crystal. *Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics*. 2013. Vol. 87. No. 3 (13). 033810
3. **Nastyshyn, S. Yu.**, Bolesta, I. M., Lychkovskyy, E., Vankevych, P. I., Yakovlev, M. Yu., Pansu, B., Nastishin, Yu.A. Ray tracing matrix approach for refractive index mismatch aberrations in confocal microscopy. *Applied Optics*. 2017 Vol. 56. No. 9 (20). 2467-2475
4. **Nastyshyn, S. Yu.**, Bolesta, I. M., Tsybulia, S. A., Lychkovskyy, E., Yakovlev, M. Yu., Ryzhov, Y. , Vankevych, P. I., Nastishin, Yu. A. Differential and integral Jones matrices for a cholesteric. *Physical Review A*. 2018. Vol. 97. No. 5(4). 053804
5. **Настішин, С.**, Болеста І., Настішин Ю. Диференційна матриця Джонса холестерика. *Електроніка та інформаційні технології*. 2018. В. 9. С. 32-39.
6. **Nastyshyn, S. Yu.**, Bolesta, I. M., Tsybulia, S.A., Lychkovskyy, E., Fedorovych, Z. Y., Khaustov, D. Y., Ryzhov, Y., Vankevych, P. I., Nastishin, Y.A. Optical spatial dispersion in terms of Jones calculus. *Physical Review A*. 2019. Vol. 100. No. 1(3). 013806.

Матеріали конференцій

1. **Nastyshyn S. Yu.**, Mudryi S. I., Nastishin Yu. A. Method of differential Jones matrices for oblique light propagation through deformed nematic cells. // International Conference of Students and Young Scientists on Theoretical and Experimental Physics. EVRIKA-2013, Lviv, May 15-17, 2013, Abstracts, B23.
2. **Nastyshyn S. Yu.**, Mudryi S. I., Nastishin Yu. A., Vlokh R. O. Differential Jones Matrix for a Cholesteric. // International Conference of Students and Young

- Scientists on Theoretical and Experimental Physics. EVRIKA-2014, Lviv, May 15-17, 2014 Abstracts, p. 64
3. **Nastyshyn S. Yu.**, Mudryi S. I., Nastishin Yu. A., Vlokh R. O. Differential Jones Matrix for a cholesteric liquid crystal. // Scientific seminar on parametric optics devoted to the 80th anniversary of the birth of Professor O.G.Vloh. July 4, 2014, Institute of Physical Optics, Lviv-2014, Abstracts, p. 33
 4. **Nastyshyn S. Yu.** Differential Jones Matrix for a cholesteric with an arbitrary pitch. // Materials of the VIII Ukrainian-Polish Scientific and Practical Conference Electronics and Information Technologies (ELIT-2016). - Lviv-Chynadiyevo, Ukraine, August 27-30, 2016. p.161-162.
 5. **Nastyshyn S. Yu.**, Bolesta I., Lychkovskiy E., Vankevych P., Yakovlev M., Pansu B., Nastishin Yu. Extended 2×2 ray tracing matrix method for off-axial propagation of Gaussian beam through a spherical surface // Materials of the IX Ukrainian-Polish Scientific and Practical Conference Electronics and Information Technologies (ELIT-2017). - Lviv-Chynadiyevo, Ukraine, August 28-31, 2017. p.186.
 6. **Nastyshyn S.**, Bolesta I., Lychkovskyy E. , Khaustov D., Nastishin Yu. Optical spatial dispersion in terms of Jones matrix calculus. // XXII International seminar on physics and chemistry of solids. Book of abstracts. Lviv, June 17-19, 2020. P. 103.

АНОТАЦІЯ

Настішин С. Ю. Матричні методи опису поширення світла через деформовані рідкокристалічні середовища. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису, дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05 – оптика, лазерна фізика. – Інститут фізичної оптики імені О.Г.Влоха Міністерства освіти і науки України, Львів, 2020.

Робота присвячена розвитку матричних методів для опису похилого поширення світла через деформовані рідкі кристали, для врахування просторової оптичної дисперсії у формалізмі матриць Джонса, у тому числі для холестеричного рідкого кристалу в режимі селективного відбивання, а також для опису оптичних аберацій у конфокальній 3D мікроскопії, спричинених різними показниками заломлення середовищ, через які проходить світловий пучок з врахуванням просторової неоднорідності показника заломлення в деформованому рідкому кристалі.

Метод матриць Джонса спочатку був розроблений для випадку поширення світла вздовж нормалі до плоскої анізотропної пластини середовища. Були спроби модифікувати метод матриць Джонса шляхом введення так званих узагальнених матриць Джонса (УМД) для похилого поширення світла через рідкі кристали (РК). Під похилим поширенням світла ми розуміємо поширення світла під кутом до нормалі поверхні плоского зразка.

Однак, отримані вирази виявилися надто складними для формульного (не чисельного, або аналітичного) аналізу. В даній роботі проаналізовано отримані в літературі УМД і показано, що вони можуть бути зведені до компактних форм звичайними тригонометричними перетвореннями без жодних додаткових наближень та обмежень. Застосувавши підхід диференційних матриць Джонса до

компактної форми УМД Єха [P. Yeh, J. Opt. Soc. Am. 72, 507 (1982)], отримано матриці Джонса для довільно деформованих рідкокристалічних комірок.

У роботі метод матриць Джонса розширено для врахування оптичної просторової дисперсії (ОПД). Для того, щоб показати місце розвиненого в даній роботі підходу ДМД для опису ОПД серед інших відомих в літературі підходів, ми встановили зв'язок між запропонованим ДМД підходом та традиційним підходом псевдо-тензора гірації, а також із підходом Могена, який був розроблений для опису поширення світла в холестеричних рідких кристалах.

Метод матриць траєкторії світлового променя (МТСП) застосовано для опису оптичних аберацій у конфокальній 3D мікроскопії, спричинених неспівпадінням показників заломлення. Отримано співвідношення між фактичним положенням фокуса (ФПФ) та номінальним положення фокуса (НПФ) для Гаусового пучка, сфокусованого у заповненому рідиною капілярі та у сферичній краплі у випадках осьових та поза-осьових Гаусових пучків.

Ключові слова: формалізм матриць Джонса, інтегральна та диференціальна матриці Джонса, просторова оптична дисперсія, похиле поширення світла, деформовані рідкі кристали.

АННОТАЦІЯ

Настишин С. Ю. Матричные методы описания распространения света через деформированные жидкокристаллические среды. - Квалификационная научная работа на правах рукописи, диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 - оптика, лазерная физика. - Институт физической оптики имени О. Г. Влоха Министерства образования и науки Украины, Львов, 2020.

Работа посвящена развитию матричных методов для описания наклонного распространения света сквозь деформированные жидкие кристаллы, для учета пространственной оптической дисперсии в формализме матриц Джонса, в том числе для холестерического жидкого кристалла в режиме селективного отражения, а также для описания оптических аберраций в конфокальной 3D микроскопии, вызванных несовпадением показателей преломления сред, через которые проходит световой пучок с учетом пространственной неоднородности показателя преломления в деформированном жидком кристалле.

Метод матриц Джонса изначально был разработан для случая распространения света вдоль нормали плоской пластины анизотропной среды. Были попытки модифицировать метод матриц Джонса путем введения так называемых обобщенных матриц Джонса (ОМД) для наклонного распространения света сквозь жидкие кристаллы (ЖК). Однако, полученные выражения оказались слишком громоздкими для формульного анализа. В данной работе проанализированы полученные ОМД и показано, что они могут быть сведены к компактным формам обычными тригонометрическими преобразованиями без дополнительных приближений и ограничений. Применив подход дифференциальных матриц Джонса

к форме УМД Эха [P. Yeh, J. Opt. Soc. Am. 72, 507 (1982)], получено матрицы Джонса для произвольно деформированных жидкокристаллических ячеек.

В работе метод матриц Джонса расширен для учета оптической пространственной дисперсии (ОПД). Для того, чтобы показать место развитого в данной работе подхода ДМД для описания ОПД среди других известных в литературе подходов, мы установили связь между предложенным ДМД подходом и традиционным подходом псевдо-тензора гирации, а также с подходом Могена, который был разработан для описания распространение света в холестерических жидких кристаллах.

Метод матриц траектории светового луча (МТСЛ) применен для описания оптических аберраций в конфокальной 3D микроскопии, вызванных несопадением показателей преломления. Получено соотношение между фактическим положением фокуса (ФПС) и номинальным положения фокуса (НПФ) для Гауссовского пучка, сфокусированного в заполненном жидкостью капилляре и в сферической капле в случаях осевых и вне-осевых Гауссовских пучков.

Ключевые слова: формализм матриц Джонса, интегральная и дифференциальная матрицы Джонса, пространственная оптическая дисперсия, наклонное распространение света, деформированные жидкие кристаллы.

ABSTRACT

Nastyshyn S. Y. Matrix's methods for the description of light propagation through distorted liquid crystalline mediums. – Manuscript. Thesis for a Degree of Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, specialty 01.04.05 - Optics, Laser Physics. – O.G. Vlokh Institute of Physical Optics, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2020.

The work is devoted to the description of oblique light propagation through the distorted liquid crystalline mediums, to the taking into account of optical spatial dispersion in terms of Jones matrix formalism including the cholesteric liquid crystal in the regime of selective light reflection as well as to the description of optical aberrations in confocal microscopy caused by refractive indexes mismatches of media in which light beam is propagating including the case of the distorted liquid crystalline medium having the spatially non-uniform refractive index.

The most general approach for resolving the novel and classical problems in the field of optics is based on Maxwell's differential equations. The differential Maxwell's equations and the material equations create together the full equations system and it makes a capability for calculating the electrical field vector of the light wave propagating in the medium. The mentioned theory is based on the differential equation of the second-order that has four variables: three special coordinates and time. Significant simplification was achieved with Jones matrices formalism in which entering Jones vector of electrical field vector \vec{E}_0 is related to exiting Jones vector of electrical field \vec{E} via a linear equation: $\vec{E} = J\vec{E}_0$ where J is the Jones matrix of the medium. One of the benefits of Jones matrices formalism is the analytical form of propagating and exiting Jones vector of electrical field vector.

Jones matrix formalism was developed originally for the case of normal light propagation through the medium. In the literature there are attempts to build so-called extended Jones matrices for the description of oblique light propagation through distorted liquid crystalline media. But these results appear to be of too long and too complicated forms for analytical consideration. In this work we analyze the available extended Jones matrices and show that they can be simplified to a compact form via conventional trigonometric transformations. The approach of differential Jones matrices is employed to derive a compact form of Yeh's extended Jones matrices [P. Yeh, J. Opt. Soc. Am. 72, 507 (1982)] for distorted liquid crystals.

In this work the Jones matrix formalism is extended to account for the phenomena of optical spatial dispersion. We have established the relation of the differential Jones matrix approach, proposed in this paper, to the traditional optical spatial dispersion approach of the gyration pseudo-tensor as well as to that developed by Mauguin for light propagation in cholesteric liquid crystals.

The ray tracing matrices approach is employed for description of optical aberrations in confocal microscopy of distorted liquid crystals. We have employed the ray tracing matrix approach for the description of focusing of Gaussian beam in the capillary gap filled with liquid. The relation between nominal focus position (NFP) and actual focus position (AFP) is derived. The obtained equation describes the so-called rescaling property caused by refractive index mismatch. According to this property, a layer of the thickness d_0 with the refractive index n will be imaged by a confocal microscope with a dry objective as a layer that is n times thinner than the air layer of the same thickness d_0 . We illustrate this property with the 3D fluorescent confocal microscopy image of a flat glass capillary partially filled with dye-doped glycerol scanned on two sides of its meniscus with air.

We predict and experimentally confirm that due to the vertical refractive index mismatch rescaling a liquid crystalline layer with highly non-uniform director distribution should be imaged as a layer of non-uniform thickness, apparently appearing to be imaged with a rough upper (rear) surface. Our next step was to employ the ray tracing approach to the focusing of a paraxial Gaussian beam inside a spherical droplet. We find that for the on-axial case there is no focal shift for the probing beam, whether it is focused in the center or in the south pole of the droplet; for all other focus positions, the AFP is shifted toward the droplet center. Our expression relating NFP and AFP in the on-axial case is equivalent to Abbe's invariant for refraction by a spherical surface.

Key words: Jones matrixes formalism, differential and integral Jones matrices, optical spatial dispersion, oblique light propagation, distorted liquid crystals.